

Постановка задачи оптимального оперативного управления графиком движения воздушных судов при условии минимизации задержек

Ю.Л. Короткова¹, Ю.А. Мезенцев¹

¹Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса 20, Новосибирск, Россия, 630073

Аннотация. В работе рассмотрена общая задача управления расписанием авиакомпании. Представлена содержательная постановка задачи оптимального оперативного управления графиком движения воздушных судов авиакомпании. Рассматриваемая задача является NP – трудной, заключается в управлении назначениями конкретных воздушных судов по рейсам с учетом заданного критерия эффективности на основании оперативной информации о текущем статусе выполнения планового графика движения. Раскрывается понятие «распространяемой задержки». Приведена формальная постановка задачи оптимального управления расписанием авиакомпании с критерием минимизации суммарных распространяемых задержек на вылет.

1. Введение

Расписание - основа деятельности любой авиакомпании. При этом задача оптимального управления оным является крайне сложной ввиду высокой размерности и необходимостью учета ряда производственных ограничений.

В данной работе представлено описание общей задачи управления расписанием авиакомпании, а также представлена оригинальная постановка подзадачи оперативного оптимального управления расписанием авиакомпании при условии суммарных распространяемых задержек на вылет.

2. Общая задача планирования расписания авиакомпании

Впервые попытка решить задачу оптимального управления расписанием была предпринята в 1989 году Abara для авиакомпании American. Впоследствии решение подобных задач выполнялось для таких авиакомпаний как United Airlines, Delta [1]. Поскольку задача планирования является слишком большой, чтобы быть решенной в один этап, она традиционно разделяется на подзадачи, которые затем рассматриваются отдельно или совместно.

В статье [1] представлено деление процесса управления расписанием авиакомпании на следующие подзадачи:

- формирование расписания;
- распределение типов воздушных судов по направлениям оперирования;
- построение графиков движения воздушных судов с учетом необходимого технического обслуживания;

- планирование экипажей [2, стр. 16; 7, стр. 369].

Авторы работы [1] ссылаются на более старые источники, в которых приводится подобная структура задачи, что подтверждает тезис о том, что подобная классификация является типовой.

2.1. Форматирование расписания

Результатом процесса формирования является расписание, характеризующиеся перечнем конкретных направлений полетов, частотами и конкретными временами вылета и прибытия каждого рейса. Расписание рейсов авиакомпании является ключевым объектом управления авиакомпанией и обеспечивает основу для тактического и оперативного планирования ресурсов, необходимых для производства полетов.

Структурированное описание процесса формирования расписания представлено в работе [20], в которой приведено деление на оперативное, тактическое и статическое планирование. В работе описываются сроки, в которые производится планирование расписания на том или ином этапе, а также перечислен набор основной входной и выходной информации.

Основным документом, которым руководствуются авиакомпании являются рекомендации IATA (International Air Transport Association, неправительственная организация авиаперевозчиков, занимающаяся вопросами организации и регулирования воздушных перевозок, была основана в апреле 1945 г.). В библиографическом списке под номером [8] представлен один из важнейших документов IATA, который был изучен ввиду того, что большинство авиакомпаний по всему миру выстраивают свои производственные процессы, руководствуясь представленными в нем требованиями. IATA. В документе [8] указано, что авиакомпании формируют расписание и осуществляют производственную деятельность в рамках летнего (это период времени с последнего воскресенья марта по последнее воскресенье октября) и зимнего сезона (период времени с конца летнего IATA-сезона с по последнюю субботу марта). Таким образом, существенные изменения расписание претерпевает, как минимум, дважды в год, при планировании IATA-сезона, чтобы отразить маркетинговые цели и скорректировать его под разные модели путешествий между зимними и летними месяцами. Далее, на ежемесячной основе вносятся незначительные изменения на основании информации об изменившихся потребностях рынка, изменении расписания и цен конкурентов, а также изменении в ключевых ресурсах, таких как количество воздушных судов, количество экипажей, ограничения в аэропорту и т.д. Большинство изменений заключается в корректировке частоты полетов на определенных рынках. Это в свою очередь может потребовать корректировки времени вылета рейсов таким образом, чтобы были сохранены запланированные стыковочные маршруты. При внесении изменений нужно также учитывать тот факт, что спрос на воздушные перевозки очень чувствителен к времени отправления с хорошо известными пиками в утренние и дневные часы. Изменения в расписании также должны быть скорректированы с учетом времени стыковки в крупных аэропортах, которые также накладывают свои ограничения на расписание, поскольку именно аэропорт согласовывает слот для каждого рейса (времена прилетов и вылетов).

В конечном счете, расписание должно быть разработано таким образом, чтобы обеспечить максимальную рентабельность, снабжая рынок соответствующими емкостями с учетом ограничений доступных емкостей и кадровых ресурсов [1, стр. 4].

2.2. Распределение типов воздушных судов по направлениям

Расписание должно быть составлено таким образом, чтобы максимизировать совокупный возможный доход при наличии тех или иных ограничений. Авиакомпании вкладывают огромные средства с целью обеспечения необходимой инфраструктуры для обеспечения производства полетов. С целью обеспечения максимальной эффективности производственного процесса, все ресурсы (воздушные суда, экипажи) должны использоваться в полном объеме, с минимальным временем простоя.

Эта задача усложняется тем, что, как правило, авиакомпании имеют несколько типов воздушных судов, которые могут быть приняты не всеми аэропортами (в зависимости от

наличия допусков) и обслуживаться экипажами, имеющими соответствующие допуски. Воздушные суда одного типа – это самолеты от одного и того же производителя, имеют одинаковую емкость и могут управляться одним и тем же кабинным экипажем. Таким образом, Boeing 738 будет одним типом, а Airbus 320 - другим. При этом, даже Boeing 737-300 и 737-400 могут рассматриваться как различные типы из-за разницы в количестве пассажирских мест. Кабинный экипаж может быть сертифицирован для полетов одного или нескольких из этих типов флота. Например, одному и тому же экипажу может быть разрешено летать как на самолетах серии Boeing 737-300, так и на самолетах серии Boeing 737-400, поскольку они имеют одинаковую конфигурацию кабины [1, стр. 3].

Решение задачи выполняется с помощью FAM-моделей (Flight Assignment Model) и заключается в присвоении конкретного типа воздушного судна по каждому направлению оперирования, максимально сокращая разницу между предоставляемым количеством емкостей и спросом. Решение позволяет повысить экономическую эффективность за счет сокращения расходов, вызванных наличием избыточных емкостей и повышением доходности ввиду возможности использования более гибкой тарифной политики. Данная задача актуальна, как правило, при планировании сезонного расписания.

Как было отмечено ранее, впервые попытка решить задачу оптимального управления расписанием была предпринята в 1989 году Abara для авиакомпании American. Данная попытка была описана в работе [9]. В работе [10] Subramanian и соавт. (сотрудники) Delta Airlines также описывается аналогичная задача оптимального распределения парка воздушных судов по направлениям оперирования, представлена математическая модель. Авторы делают оценку ожидаемого эффекта от реализации оптимального алгоритма – более 300 000 долларов в день.

Спустя год, в работе [1, стр.8] упоминаются результаты апробации модели моделей оптимального распределения флота в авиакомпании Delta (1991). В результате оценка такова, что за счет моделирования назначений экономия затрат в летние месяцы достигала 220000 долларов в день [1, стр.8]. В этой же статье [1] говорится о том, что аналогичная модель была использована в авиакомпании USAir (1993), которая отчиталась об экономии порядка 15 долларов в год.

Разработка оптимальных алгоритмов решения FAM-моделей продолжается до сих пор, наиболее активными в этой области являются исследователи Massachusetts Institute of Technology и Georgia Institute of Technology. В России попытки исследования задачи распределения парка предпринимались в 2008 – 2016гг. [11, 12, 16, 21].

В работе [12] представлена классическая постановка задачи распределения парка воздушных судов по направлениям с целью сокращения расходов исходя из ожидаемого спроса на направлении и расходов на кресло километр.

В работах [11,16] задача распределения воздушных судов по направлениям расширена, в результате решения представленной модели формируются цепочки рейсов для каждого типа воздушного судна. Авторы уделяют особо внимание анализу вариантом сокращения размерности задачи за счет разбиения множества рейсов на группы.

В работе [21] задача распределения воздушных судов по направлениям рассматривается как подзадача более общей постановки. В качестве целевой функции автор рассматривает сокращение налета, обосновывая это возможностью сокращения расходов через оптимизацию использования парка.

2.3. Планирование графиков движения воздушных судов

До момента планирования графиков движения воздушных судов, в расписании определены только типы воздушных судов по направлениям движения. На этапе построения графиков движения воздушных судов на каждый конкретный вылет рейса назначается конкретный бортовой номер воздушного судна таким образом, чтобы обеспечить выполнение необходимо технического обслуживания [13, стр.21; 14, стр. 330]. Таким образом, для каждого конкретного воздушного судка в парке формируется цепочка рейсов - последовательность рейсов, выполняемых самолетом в течение дня, построенная таким образом, чтобы обеспечить надлежащее выполнение требований по техническому обслуживанию. Техническое

обслуживание (ТО) авиационной техники – это комплекс работ, выполняемый для поддержания летной годности ВС при его подготовке к полетам, а также при обслуживании воздушного судна и его компонентов после полетов, при хранении и транспортировке. Частота ТО зависит от сочетания летных часов и количества циклов взлета и посадки и может быть выполнена на любой площадке надлежащим образом. Во многих авиакомпаниях используется классификация ТО, формируемая на основании таких характеристик, как объем, продолжительность и частота ТО. В статье [12] представлена следующая классификация видов технического обслуживания:

- Transit check - самая простая форма сервисного обслуживания самолёта, выполняется перед каждым вылетом воздушного судна.
- Daily Check - ежесуточная проверка технического состояния воздушного судна, должна выполняться каждые 24 часа.
- Weekly Check - выполняется приблизительно раз в неделю, не требует обязательного наличия помещения (ангара). Как правило длительность данного вида ТО составляет 3-4 часа.
- A-check - производится примерно раз в месяц или каждые 500 часов налёта. A-check, как правило, выполняется в ночное время суток в ангаре базового аэропорта. Содержание данного вида работ зависит от типа самолёта, количества циклов (т.е. взлётов и посадок) или количества часов налёта с момента последней проверки.
- B-check - осуществляется примерно каждые 3 месяца.
- C-check - является более сложной формой ТО и выполняется каждые 15 — 20 месяцев или 4 000 часов налёта. Для выполнения данного вида работ требуется вывести самолёт из эксплуатации на некоторое время (порядка 2-х недель), а также обязательным условием выполнения работ является наличие пространства (ангара).
- D-check - самая тяжёлая форма обслуживания воздушного судна. Проверка выполняется приблизительно раз в 12 лет и длится 30-40 дней. В это время выполняется комплексная проверка всего воздушного судна, его узлов и деталей. Узлы, выработавшие ресурс или не прошедшие проверку, подлежат замене.

Что касается исследований области оптимизации графиков движения воздушных судов с учетом требований о выполнении необходимого ТО, то можно сказать, что это задача – всего лишь подвид задач о назначении воздушных судов.

В статье [2, стр.4-5] приводится перечень основных источников по данной теме. Это работы Feo and Bard (1989), Kabbani and Patty (1992), Desaulniers и соавт. (1997), Clarke и соавт. (1996), Barnhart et al. (1998b), Gopalan and Talluri (1998), and Talluri (1998). Авторы статьи [2] отмечают, что модели планирования графиков движения воздушных судов с учетом ТО предполагают, что график работы будет повторяться каждый день и самолеты, которые находятся в базовом аэропорту, имеют возможность пройти техническое обслуживание.

При этом эффект от использования таких моделей посчитать крайне сложно. Также важно, что модели, акцентирующие внимание на своевременности выполнения ТО, не пригодны для использования в рамках оперативного управления, так как не учитывают последствия задержек и отмен рейсов [2].

2.4. Планирование экипажей

Задачи, связанные с планированием экипажей, также были подняты Абага в его первой работе [9]. Цель процесса планирования экипажа состоит в том, чтобы назначить имеющиеся экипажи на рейсы с соответствующими типами воздушных судов таким образом, чтобы общая стоимость экипажа для всего расписания была сведена к минимуму при удовлетворении условий доступности экипажа и норм режима труда и отдыха.

Оптимальное расписание экипажа должно быть максимально плотным, так, чтобы экипажи проводили большую часть своих рабочих часов в полете. Заработная плата летного состава является одной из существенных статей расходов авиакомпании, которая зависит не только от налета, но и от количества посадок, ночных вылетов, общего рабочего времени вне базы,

минимальной гарантированной оплаты труда [16, стр. 2]. Когда расписание экипажа оптимизировано, расходы на персонал и другие связанные расходы, такие как суточные, гостиница, сверхурочные сводятся к минимуму. Подобная оптимизация позволяет экономить миллионы долларов в год [1, стр. 4, 20-21].

С учетом вышеописанного можно заключить, что решение задачи планирования экипажей заключается в таком назначении летного и кабинных экипажей на рейсы, при котором затраты на экипажи будут минимизированы при условии удовлетворения требований регуляторов и условиям режима труда и отдыха [17].

В работах [18, 20] задача назначения экипажей разбивается на два последовательных этапа:

- Airline Crew Pairing Problem (ACPP),
- Airline Crew Rostering Problem (ACRP).

На первом определяется минимальный набор летных заданий, требуемый для того, чтобы обслужить все рейсы полетного расписания на горизонт планирования с учетом всех требований. На втором - каждому члену экипажа, в соответствии с его параметрами (допуски, время отдыха, класс обслуживания и др.), назначается индивидуальное летное задание. Решение этих оптимизационных задач чрезвычайно трудоемко и требует значительных вычислительных ресурсов. Поскольку экипажи обычно не летают на нескольких типах воздушных судов в течение того же месяца, планирование может быть разбито на отдельные задачи, по одной для каждой группы экипажей.

2.5. Оперативное управление расписанием авиакомпании

В настоящее время наиболее актуальной является задача оперативного управления расписанием авиакомпании. Оперативное управление предполагает корректировку назначений конкретных бортовых номеров воздушных судов по рейсам с учетом заданного критерия оптимальности на основании оперативной информации о текущем статусе выполнения рейсов. Именно от эффективности управленческих решений на этапе оперативного планирования зависят такие параметры как прямые эксплуатационные расходы, регулярность рейсов (т.н. своевременность прибытия/отправления рейсов).

График движения воздушных судов предполагает определение последовательности выполнения рейсов по маршрутам оперирования авиакомпании для каждого воздушного судна. Как следствие, задержка при выполнении одного рейса может привести к дальнейшим сбоям – нарушению графика выполнения последующих рейсов. Одними из первых, кто поднял вопрос оптимизации расписания с учетом критерия минимизации задержек, были Lan, Clark, Barnhart. В работе [2] они представили следующую классификацию задержек: распространяемые (задержки, возникающие, вследствие задержки воздушного судна на предыдущем этапе полета) и не распространяемые (задержки, не связанным с нарушением графика выполнения предыдущих этапов маршрута движения воздушного судна). Основой для расчета времени распространяемой задержки является понятие минимального времени обслуживания воздушного судна в аэропорту оперирования (МТТ). Как правило, временной интервал между рейсами превышает МТТ с целью обеспечить резерв времени на случай задержек. Идея, находящая в основе рассматриваемой задачи, заключается в таком оптимальном формировании графиков движения воздушных судов, при котором обеспечивается необходимый резерв времени для компенсации задержек предыдущих этапов полета.

Наиболее общей и актуальной задачей теории расписаний применительно к производственным системам является задача синтеза расписаний параллельно-последовательных обслуживающих систем. Общую постановку такой задачи, связанных с ней подзадач и описание некоторых алгоритмов решения можно найти в работах [3-6]. Пусть имеется ряд заявок, которые необходимо распределить между параллельными приборами при известной (различной) производительности таким образом, чтобы минимизировать суммарное время обслуживания всех заявок (минимизировать время окончания работы всей системы, минимизировать суммарные затраты, либо максимизировать некоторый показатель качества обслуживания заявок). Прерывания обслуживания запрещены. Пусть также известно расписание поступления

заявок в параллельную обслуживающую систему (ПОС). В этом случае необходимо учитывать величины задержек поступления заявок.

Примером ПОС может служить парк воздушных судов авиакомпании. В этом случае одной из основных задач является оптимизация управления назначениями воздушных судов и графиками рейсов авиакомпании.

Содержательно задача оперативного управления заключается в таком перераспределении воздушных судов по рейсам авиакомпании за планируемый период, которое минимизирует суммарное время распространяемых задержек при условии, что а) не будет ни одного рейса с отсутствующим назначением воздушного судна, б) для каждого рейса будет назначен только один борт и с) количество распределенных на рейсы воздушных судов не будет превышать входящее ограничение. В качестве исходных данных для решения задачи используются плановое расписание движения воздушных судов авиакомпании, минимальное время наземного обслуживания для всех типов воздушных судов, информация об ограничениях по количеству бортов в парке, а также оперативная информация о задержках рейсов на любой заданный момент времени во всех аэропортах.

3. Формальная постановка задачи оптимального оперативного управления назначениями и графиком рейсов авиакомпании

Формальная постановка задачи основана на подходе, описанном в [5,6].

Введем условные обозначения:

l , - номер порта $l \in L, \bar{L} = \sup L$; i - номер рейса $i \in I_l, \bigcup_{l \in L} I_l = I$,

$I_l \cap I_{l'} = \emptyset, \forall l, l' \in L, \bar{I} = \sup I$; s , - тип ВС $s \in S, \bar{S} = \sup S$; j - номер ВС $j \in J_s$,

$\bigcup_{s \in S} J_s = J, J_s \cap J_{s'} = \emptyset, \forall s, s' \in S, \bar{J} = \sup J$; $\tau_{i,j}^0$ - расчетное время вылета i -го рейса на

момент анализа расписания, $\tau_{i,j}^0 \geq 0, i \in I_l, \forall l \in L, T^0 = \|\tau_{i,j}^0\|, j \in J_s, \forall s \in S$;

Здесь и далее $\|\cdot\|$ обозначает вектор, матрицу или тензор, соответствующей контексту размерности.

$t_{i,j}$ - время обслуживания, подготовки и полета рейса i ВС $j, T = \|t_{i,j}\|, i \in I_l, \forall l \in L, j \in J_s \forall s \in S$.

Требуется найти $x_{i,j}$ при условиях:

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если ВС } j \text{ назначено на рейс } i, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad i \in I_l, \forall l \in L, j \in J_s, \forall s \in S, \quad (1)$$

$$\sum_{j \in J} x_{i,j} = 1, i \in I_l \forall l \in L, \quad (2)$$

Равенства (2) означают, что на рейс i назначается только одно воздушное судно,

$$\underline{b}_j \leq \sum_{i \in I} x_{i,j} \leq \bar{b}_j, j \in J_s \forall s \in S, \quad (3)$$

Неравенства (3) задают требования к ВС, на которое может быть назначено не менее чем на \underline{b}_j и не более чем на \bar{b}_j рейсов.

Определим $\tau_{i,j}$ - возможное время задержки вылета воздушного судна j рейсом $i, i \in I_l, \forall l \in L, j \in J_s, \forall s \in S$, (может принимать отрицательные значения, что учитывается ограничениями (5) и (6)).

$$\tau_{i,j} = \tau_{i,j}^0 - \sum_{k \in I_k} (\tau_{k,j} + t_{k,j}) x_{k,j}, \quad \forall i \notin I_k, j \in J_s, s \in S, \quad (4)$$

Равенства (4) означают, что задержка вылета ВС j на текущем этапе (рейсе i) является рекурсивной функцией задержек предыдущих рейсов этого воздушного судна

$$\widehat{\tau}_{i,j} = \tau_{i,j} + y_{i,j} \geq 0, \quad i \in I_l, \forall l \in L, j \in J_s, \forall s \in S, \quad (5)$$

$$y_{i,j} \geq 0 \quad i \in I_l, \forall l \in L, j \in J_s, \forall s \in S, \quad (6)$$

Условия (5) и (6) нейтрализуют отрицательные задержки за счет переменных-компенсаторов $y_{i,j} \geq 0$, тогда $\widehat{\tau}_{i,j} \geq 0$ зависимые переменные задачи, имеющие смысл скорректированных задержек между прибытием ВС j и его вылетом рейсом i , с учетом необходимого времени обслуживания на земле.

$$\sum_{i \in I_l} \widehat{\tau}_{i,j} x_{i,j} + \sum_{i \in I_l} t_{i,j} x_{i,j} \leq \lambda, \quad \forall l \in L, j \in J_s, s \in S, \quad (7)$$

$$\lambda \rightarrow \min. \quad (8)$$

Условия (7) и (8) определяют минимаксный критерий быстрогодействия. Его использование способствует организации равномерной загрузки парка воздушных судов, минимизируя максимальный суммарный простой любого воздушного судна из всего множества ВС флота авиакомпании.

Выражения (4), опосредующие ограничения (5) и (7) содержат рекурсии, поскольку всякие последующие (по времени) значения $\tau_{i,j}$ и $\widehat{\tau}_{i,j}$ зависят от предыдущих.

Подробности раскрытия рекурсий для постановки идентичной (1)-(8) с формированием одноэтапной задачи (которую для краткости будем именовать прямой редукцией), а также последующего формирования упрощенной (релаксированной) задачи с двумя критериями (именуемой бикритериальной релаксацией) позволяющей находить приближенные к оптимальным по быстродействию расписания можно найти в [3, 4]. Там же экспериментально доказана неэффективность использования прямой редукции. Так, например, для нахождения даже приближенного решения с не превышающим шести процентов отклонением от оптимума реализации задачи для 20 рейсов и 5 ВС, потребовалось более 16 часов времени счета 6-ядерного процессора с использованием последней версии IBM ILOG CPLEX optimization studio. Там же [3] можно найти результаты применения бикритериальной релаксации с использованием CPLEX.

4. Заключение

В работе проведен обзор общей задачи управления расписанием авиакомпании, а также содержательная и формальная постановка задачи оперативного управления расписаниями авиакомпаний с учетом критерия минимизации задержек. Поставленная задача имеет высокую практическую значимость и неплохие перспективы внедрения в практику планирования авиакомпаний любого масштаба. В дальнейших работах будут рассмотрены возможные подходы к решению рассматриваемой задачи.

5. Литература

- [1] Rushmeier, R.A. Recent Advances in Exact Optimization of Airline Scheduling Problems / R.A. Rushmeier, K.L. Hoffman, M. Padberg // Technical Report, 1995.
- [2] Lan, S. Planning for Robust Airline Operations: Optimizing Aircraft Routings and Flight Departure Times to Minimize Passenger Disruptions / S. Lan, J.P. Clark, C. Barnhart // Transportation science. – 2006. – Vol. 40(1).
- [3] Мезенцев, Ю.А. Оптимизация расписаний параллельных динамических систем в календарном планировании // Информационные технологии. – М.: Изд-во «Новые технологии», 2008. – № 2. – С. 24-33.
- [4] Мезенцев, Ю.А. Эффективные вычислительные методы решения дискретных задач оптимизации управления производственными процессами. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2015. – 274 с.

- [5] Мезенцев, Ю.А. Оптимизация расписаний параллельно-последовательных систем в календарном планировании // Информационные технологии. – М.: Изд-во «Новые технологии». – 2009. – № 6. – С. 35-41.
- [6] Мезенцев, Ю.А. Прикладные задачи и алгоритмы оптимизации расписаний параллельных обслуживающих систем // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2016. – № 1(62). – С. 49-73.
- [7] Barnhart, C. Application operation research in the air transport industry / C. Barnhart, P. Belobaba, A.R. Odoni // Transportation science. – 2003. – Vol. 37(4). – P. 368-391.
- [8] Worldwide Scheduling Guidelines. International Air Transport Association. – Montreal, Geneva, 2005. – 77 p.
- [9] Abara, J. Applying integer linear programming to the fleet assignment problem / J. Abara // Interfaces. – 1989. – Vol. 19(4). – P. 20-28.
- [10] Subramanian, R. Coldstart: Fleet Assignment at Delta Air Lines / R. Subramanian, R.P. Scheff, J. Quillinan, D.S. Wiper, R. Marsten // Interfaces. – 1994. – Vol. 24(1). – P. 104-120.
- [11] Виноградов, Л.В. Математическое моделирование в оптимизации авиационных перевозок: перспективы развития и эффект от использования / Л.В. Виноградов, Г.М. Фридман, С.М. Шебалов // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2008. – № 132.
- [12] Павлова, Л.В. Моделирование расстановки парка ВС на рейсы авиакомпании // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2016. – Т. 19, № 5.
- [13] Ageeva, Y. Approaches to incorporating robustness into airline scheduling // Master Thesis Operations Research center. – Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [14] Liang, Z. The Aircraft Maintenance Routing Problem / Z. Liang, W.A. Chaovalitwongse // Optimization and Logistics Challenges in the Enterprise. – 2009. – Vol. 30. – P. 327-348.
- [15] Техническое обслуживание самолета [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://aviado.ru/guide/planes/checks/>.
- [16] Васильев, Ю.М. Решение задачи равномерного разбиения рейсов летного расписания авиакомпании: точная математическая постановка / Ю.М. Васильев, С.В. Уният, Г.М. Фридман // Известия СПбГЭУ. – 2016. – № 3(99).
- [17] Приказ Минтранса РФ от 21.11.2005 N 139 (ред. от 17.09.2010) "Об утверждении положения об особенностях режима рабочего времени и времени отдыха членов экипажей воздушных судов гражданской авиации Российской Федерации" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/189086/>.
- [18] Anbil, R. Recent advances in CrewPairing optimization at American Airlines / R. Anbil, E. Gelman, R. Patty, B. Tanga // Interfaces. – 1991. – Vol. 21(1). – P. 32-74.
- [19] Barnhart, C. Improving Crew Scheduling by incorporating key maintenance routing decisions / C. Barnhart, A.M. Cohn // Operations Research. – 2003. – Vol. 51(3). – P. 387-396.
- [20] Carlotta, M. Disruption management in the airline industry // Master Thesis, 2015.
- [21] Петрунин, С.В. Методология управления использованием воздушных судов в российских авиакомпаниях: автореф. к.т.н. – М., 2009.

Formulation of the problem of optimizing an operating flight schedule to minimize flight delays

Y.L. Korotkova¹, Y.A. Mezentsev¹

¹Novosibirsk State Technical University, K. Marksa 20, Novosibirsk, Russia, 630073

Abstract. This paper provides the schedule management task and the formulation of optimal management of Flight Schedule to Minimize flight departure delays. Described the term "delay propagation". A mathematical formulation of this problem is given. The considered problem is NP-hard. The problem's solution is to manage the assignments of specific aircraft.